

文章编号: 0451-0712(2005)02-0150-06

中图分类号: U416.26

文献标识码: B

泡沫沥青就地冷再生混合料 设计与工程应用

李秀君¹, 拾方治², 董兆辉³,

(1. 上海理工大学城建学院 上海市 200093; 2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室 上海市 200092;

3. 上海市第二市政工程有限公司 上海市 200235)

摘 要: 首先对旧路况进行调查, 包括分析病害及其原因、结构承载能力及交通条件等。其次, 采用就地冷再生机现场取样, 能够较好地反映施工情形。取样材料可进行室内混合料设计, 该设计主要包括根据取样材料和泡沫沥青级配要求, 确定混合料的设计级配; 根据沥青发泡试验, 确定选用沥青的最佳发泡条件; 试件成型后进行养护工作, 然后测试试件的间接抗拉强度(ITS), 并选择湿试件最大 ITS 值对应的沥青用量作为设计值。结合试验路工程简述了泡沫沥青就地冷再生的施工工艺, 并对再生路段的效果进行了评价。

关键词: 泡沫沥青; 就地冷再生; 设计方法; 工程应用

泡沫沥青利用沥青在膨胀状态下与冷湿集料具有很好的裹覆能力的特性, 作为一种常用的沥青类粘结剂用于道路建设, 其历史可追溯至上世纪 50 年代。泡沫沥青主要针对稳定类冷、湿料, 而这些材料在常温下与普通沥青裹覆性能不好, 沥青不易分散而易于结团, 而泡沫沥青却可以很好地分散在材料中形成强度。因此, 泡沫沥青特别适用于道路冷再生工艺, 同时这项技术已在美国、澳大利亚、南非等国家成功应用^[1], 并显示了巨大的潜力。

随着我国公路建设事业的发展, 公路养护维修也渐进高潮, 沥青混凝土路面再生技术势必成为热点研究与应用领域。本文以无锡市新区锡宅路泡沫沥青就地再生试验路为例, 结合试验室研究情况, 介绍这一技术在国内的应用情况。

1 路况调查与维修方案的选择

1.1 旧路损坏情况调查

该试验路位于硕放镇, 全长约 1.5 km, 1997 年建成通车, 是连接无锡市区与后宅镇的主要通道。由于近年路面损坏严重, 行驶质量很差, 已经引起当地居民的不满, 要求改善现有路况的呼声很高。为了改变这一状况, 无锡市公路部门决定加快对这一路段

的维修改造, 改善通行能力。

通过实地调查发现原路段出现了各种不同程度的病害, 包括常见的各种横向裂缝、纵向裂缝、龟裂、沉陷、松散、磨光、拥包等。其中以大面积龟裂、沉陷为典型病害。

通过对旧路损坏情况的调查, 发现原路段出现了比较严重的功能性损坏, 使得车辆行驶质量很差。例如路表面大面积的磨光、大小不一的坑槽以及路面不均匀沉降造成的平整度下降等。

为了评价原路段的结构承载能力, 在试验路段每间隔约 10 m 的左右行车道各测定 1 次弯沉值。弯沉测试曲线如图 1 所示。代表弯沉值达到了 256 (0.01 mm), 这表明原路段结构承载能力很弱, 已接近路面结构的极限承载能力, 为了恢复道路的结构强度, 必须对原路段进行结构性补强。

1.2 维修方案的选择

根据旧路况调查可以看出原路段损坏十分严重, 常规的局部维修方法已经无法发挥效用。罩面施工, 也只能暂时恢复旧路段功能上的不足, 在结构上起不到明显补强的作用, 而且路面出现的大量裂缝也会引起反射裂缝问题。传统的大修方法一般是将旧沥青混凝土路面和基层全部挖除, 然后再重新做

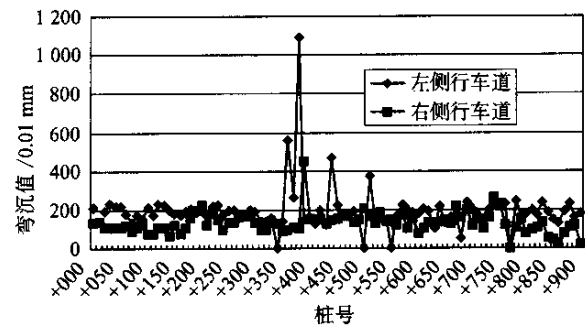


图 1 旧路弯沉测试结果

基层和面层。这样做不仅造价高、工期长、污染环境,而且需长时间中断交通。

采用先进的现场冷再生技术替代传统方法,不仅可以很好地解决原路段的病害,使其在功能上得到恢复,结构上得到补强,而且造价低,对交通干扰小,因此是最佳的维修方法。

2 取样和试样分析

2.1 取样

为了给实验室混合料设计提供准确、可靠的试验样品,决定采用 WR2500 再生机现场取样的方法。对于不同再生深度的路段应当分别取样,而且取样槽的长度不少于 2 m,深度为再生施工要求的深度。取样时,从取样槽中部取样,并且注意均匀取料,防止离析。在取样结束后,可以利用取样槽,观察路面结构层和量测不同路面结构层次的厚度。

2.2 试样的分析与级配设计

2.2.1 铣刨材料的砂当量与塑性指数试验

砂当量指标可以有效地反映细集料的含土率,是评价集料洁净程度的有效方法。同时为了检验铣刨材料的塑性指数,按照《公路工程集料试验规程》(JTJ 058—2000)中规定的方法进行砂当量和塑性指数试验,两种材料的砂当量和 15 cm 铣刨料的塑性指数结果如表 1 所示。

表 1 两种材料的砂当量与塑性指数试验结果

试样(铣刨深度)	砂当量 SE/%	塑性指数(PI)
15 cm	42.6	11

从试验结果看,两种材料的砂当量结果偏低,说明集料中含有大量泥土,泥土存在会对再生料的

性能产生一定影响。同时根据铣刨材料的塑性指数结果来看,其值偏大,因此原路面材料采用泡沫沥青稳定时需要添加一定量的水泥或者石灰降低其塑性。

2.2.2 集料的选择

可用于泡沫沥青稳定的材料相当广泛,但必须满足一定的级配要求。国外研究表明^[4],用于不同公路等级的集料,其级配范围不同,如图 2 所示。且该研究认为,落在 A 区域的集料适合用泡沫沥青稳定,且适合重交通道路;若落在 B 区域,则说明材料中细集料含量偏多,适用于轻交通道路,可加入适当的粗集料将级配调整至区域 A;区域 C 的材料因缺少细集料使得泡沫沥青稳定效果变差,通过加入适当的细集料或粉煤灰,可以改善稳定效果。不同研究机构对级配范围的界定略有差异,但普遍认为 0.075 mm 以下集料含量对泡沫沥青混合料特性有显著影响,一般建议控制在 5%~20% 范围内。

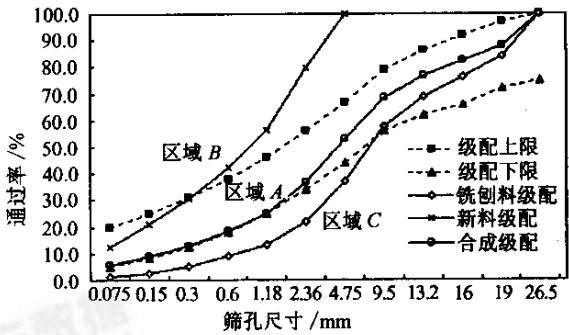


图 2 泡沫沥青冷再生混合料级配

2.2.3 级配设计

通过对铣刨料筛分分析,发现铣刨料中细料偏少,尤其 0.075 mm 筛孔通过率只有 1.5% 左右,因此需要加入一定量的细料以改善这一级配。根据当地实际情况,最后确定加入一种最大粒径为 5 mm 的米砂。同时考虑到增加泡沫沥青冷再生料的早期强度和增强其抗水损坏的能力,一般需要加入 1%~1.5% 的水泥。由于铣刨料中含有一定的泥土成分,再生料的塑性偏大,因此决定加入 1.5% 水泥。通过对铣刨料、米砂和水泥用量的调整最后确定各自的用量为铣刨料 75%,米砂 23.5% 和水泥 1.5%,调整后的级配如图 2 所示,并满足泡沫沥青混合料的级配要求。

3 发泡试验与最佳发泡条件

为了衡量沥青的发泡效果,目前主要用膨胀率(发泡体积倍数)和半衰期两个指标加以评价。

膨胀率是指在沥青发泡状态下测量的最大体积与未发泡状态下的体积之比。为了使泡沫沥青与翻腾的集料充分接触,形成良好的裹覆作用,膨胀率越大,拌制的泡沫沥青混合料质量越好。

半衰期是指泡沫沥青自最大体积时至缩小到该体积一半所用的时间。该指标实际上描述了沥青泡沫的稳定性,半衰期越长,说明泡沫越不容易衰减,可以与集料有较长的接触与拌和时间,可提高泡沫沥青混合料的质量。

实际操作时主要通过改变发泡温度和用水量,来研究膨胀率与半衰期的变化关系,以期找到最佳的发泡效果,并在这种状态下拌制泡沫沥青混合料。而通常情况下膨胀率与半衰期两者不可能同时达到最优。一般认为最好的发泡性能是出现在膨胀率和稳定性都较好之时。目前对于发泡性能尚无明确的数值标准,无论取高膨胀比还是较长的半衰期,均不如二者都适当时的效果好。

德国 Wirtgen 公司生产的 WLB10 泡沫沥青实验机是专门用于泡沫沥青试验研究和配合比设计的设备,这台机器装备在 WR2500 道路再生机上的沥青喷射系统中,只是按比例缩小了,它以 100 g/s 的速率喷洒沥青,当有泡沫沥青注入时,搅拌机就将材料和泡沫沥青拌和,因此该机器能够逼真地模拟现场施工的情形。

在室温 20℃ 左右对中油 90 号沥青进行了发泡试验,选择 150℃、160℃ 和 170℃ 3 种沥青发泡温度,每种温度下发泡用水量分别取 1%、1.5%、2% 和 3% (相对于沥青的质量分数,下同),量测其膨胀率与半衰期。由于试验中的各种条件都有可能影响试验结果,使试验的重现性不好,故为了确保数据的可靠性,每种发泡状态均反复试验 3~5 次,求其平均值,所得结果以半衰期为 x 轴,膨胀率为 y 轴,按 $y = a \ln x + b$ (其中 a 和 b 为回归系数) 对方程形式回归曲线(相关系数 0.81~0.98),如图 3 所示,图中每条曲线代表一种发泡温度,曲线上圈中数字表示发泡用水量。

根据试验所得到的各沥青发泡特性曲线,综合考虑膨胀率和半衰期 2 个因素,可得出沥青的最佳发泡温度和发泡用水量,并以此作为确定泡沫沥青混合料拌制条件的参考依据^[6]。首先将位于最上方

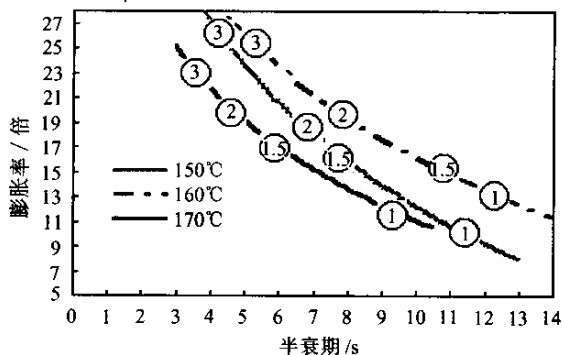


图3 中油 90 号沥青发泡特性曲线

的发泡曲线所对应的温度作为最佳的发泡温度,然后在此曲线上找出膨胀率和半衰期都较高的位置,可得出中油 90 号沥青的最佳发泡条件如表 2 所示。

表 2 中油 90 号沥青最佳发泡特性

沥青	发泡温度/℃	发泡用水量/%	膨胀率/倍	半衰期/s
中油 90 号	160	1.5	16	11

4 混合料的拌和、试件成型与养护

4.1 拌和用水量的确定

泡沫沥青混合料在拌和与压实时需要加入一定量的水,以保证较好的拌和效果与压实度。

然而,过多的水会影响压实效果及混合料的强度。因此在拌和和压实过程中必须确定一个最佳用水量。

本试验采用 Wirtgen 公司提供的经验公式^[1]:

$$W_{add} = W_{omc} - W_{moist} - W_{reduce} \quad (1)$$

$$M_{water} = \frac{W_{add}}{100} \times (M_{sample} + M_{cement}) \quad (2)$$

式中: W_{add} 为需要加入集料中的含水量,%; W_{omc} 为最佳含水量,%; W_{moist} 为集料的含水量,%; W_{reduce} 为水分的散失量,其值取 $0.3 \times W_{omc} - 0.6$,%; M_{water} 为需加入水的质量,g; M_{sample} 为集料的干质量,g; M_{cement} 为需加入水泥的质量,g。

该公式对拌和用水量的计算依赖于再生集料的最佳含水量,再生集料的最佳含水量和拌和用水量计算结果如表 3 所示。

表 3 击实试验结果与拌和用水量

设计指标	最佳含水量/%	最大干密度/(g/m ³)	拌和用水量/%
试验与计算结果	7.02	2.160	5.51

4.2 混合料的拌和与试件成型^[1]

在室温 25℃ 左右将料倒入拌和桶,采用低速档拌和均匀,然后缓慢注入所需的最佳用水量(水温在 25℃ 左右),接着将搅拌机调至高速档,拌和同时喷洒泡沫沥青。喷洒结束继续拌和约 30 s,再将泡沫沥青混合料移至一密闭容器中存放,成型马歇尔标准试件(每面击实 75 次)。

4.3 养护

将混合料按规范要求拌和并制成标准的马歇尔试件,试件击实后在室温下养生 24 h 后脱模,再置于 40℃ 的通风烘箱中进一步养生 72 h,以确保混合料中不含水分。湿试件则还需在 (25±1)℃ 条件下浸水 24 h。

5 密度测试

将养护好的试件分为两组,一组用表干法测试毛体积密度;另一组用蜡封法测试毛体积密度。测试结果表明,蜡封法测定的结果要略大于表干法,但两者相差不超过 1.5%。试件的毛体积密度随着沥青用量的增大而逐渐减小,变化幅度在 2.14~2.24 g/cm³。

6 设计沥青用量的确定

如图 4 为冷再生泡沫沥青混合料干湿间接抗拉强度(ITS,下同)随泡沫沥青用量的变化关系,结果可看出,对于不同泡沫沥青用量下干湿 ITS 都存在一个最大值,而干 ITS 最大值对应的沥青用量要略小于湿 ITS 最大值对应的沥青用量。可选择湿 ITS 最大值对应的沥青用量即 3.3% 作为设计值。

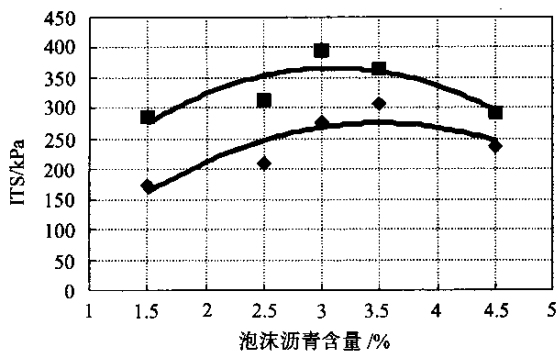


图 4 加入 1.5% 水泥时泡沫沥青用量与干湿 ITS 变化关系

从图 4 中可以看出,泡沫沥青用量在 3%~3.5% 之间时混合料强度变化不大,考虑实际工程应

用情况,因此现场泡沫沥青用量控制在 3%~3.5% 用量范围即可。同时根据试验结果泡沫沥青用量范围内残留 ITS(湿与干试件 ITS 比值)大于 0.70,可以满足抗水损坏的要求^[5]。

7 试验路施工工艺

7.1 施工机械

WR2500 冷再生机;5 t 沥青罐车;5 t 水车;Hamm20 t 单钢轮振动压路机;平地机;16 t 轮胎压路机;5 t 洒水车。

7.2 撒布米砂和水泥

根据再生层厚度、马歇尔设计密度、新料添加比例和水泥用量,撒布米砂并静压一遍至厚度为 3.5 cm,然后在米砂表面按照上述方法撒布水泥(50 kg/m²)。

7.3 施工前的准备

沥青罐车到达施工现场后要检测沥青的温度,如果沥青温度低于发泡温度则不予使用;如果温度过高(高于 20℃),则应等待一段时间,使沥青温度高于发泡温度 5~10℃ 为宜。

设定再生机的沥青用量和发泡用水量,并在施工前利用再生机上的试验喷嘴进行发泡试验,检验发泡效果。

7.4 再生施工

施工速度控制在 6 m/min,再生机初始施工时,要注意观察再生料的湿度状况,以便及时修正再生机的喷水量;同时注意观察再生料的沥青分布情况,以便及时反馈给再生机操作员,适当调整沥青用量等。由于再生机再生宽度为 2.5 m,因此 3.5 m 宽单幅路面要施工两遍,第二遍施工时要注意关闭重叠部分的喷嘴。

7.5 初压

再生施工完成后应尽快安排压路机沿再生机施工中心位置静压一遍。

7.6 整平

静压结束后,平地机进行整平工作,整平的目的在于消除再生机的轮迹印,刮平再生层使材料分布均匀,提高压实效果。平地机的切削深度由深至浅,一个再生宽度一般通过整平 2~3 遍可以满足平整度要求。

7.7 复压

整平结束后,可安排洒水车在再生层表面洒一遍水,使再生层表面湿润。然后使用振动压路机对每一个再生宽度压实 2~3 遍。

7.8 终压

复压结束后,可安排洒水车在再生层表面再洒一遍水,使再生层表面湿润。然后安排轮胎压路机对每一个再生宽度压实 2~3 遍。

7.9 开放交通

完成终压作业后,可立即开放交通。

7.10 现场再生材料的试验室评价

为了检验再生效果,在再生机施工结束后现场随机取出再生料密封后送至试验室进行有关测试。测试指标列于表 4。

表 4 现场再生材料的实验室测试结果

有关指标	含水量/%	马歇尔密度/(g/cm³)	干 ITS/kPa	湿 ITS/kPa	残留 ITS
试样 1	6.21	2.185	375	245	0.65
试样 2	5.98	2.172	370	230	0.62
试样 3	6.38	2.176	356	215	0.60

由于取回的实验材料是在取样后 5 d 才进行成型试验。试验结果表明,现场生产的冷再生料基本能够满足设计要求,再生质量较好;这也同时表明,泡沫沥青混合料具有一定的储存性能。但值得注意的是由于水泥的凝结,造成了水稳性的降低。

8 再生后的路况

8.1 弯沉测试结果

路面结构中面层和基层的弯沉值因基层材料的不同、剂量的不同、龄期的发展,相应地会有一个不同的发展变化过程。尤其对于冷再生混合料,其强度形成需要一段时间,根据澳大利亚的施工经验,泡沫沥青最终强度的形成可以持续 1 年。

在试验路段修筑竣工后 1 周,分别对各试验路段进行了基层表面的弯沉值测定,目的在于评价冷再生基层表面的初期结构承载能力。弯沉值测定按照《公路路基路面现场测试规程》(JTJ 059—95)中规定的方法进行。各试验路段每间隔约 10 m 两个车道各测定 1 次,计算其均值和标准差,并按二倍的标准差舍去异常点后,再重新计算其均值和标准差,并按 95%的保证率(二级公路标准)得到其代表值,所得结果如表 5 所示。

但必须考虑的是,由于泡沫沥青再生料中含有沥青,而且再生层厚度达到 17 cm,因此应当对泡沫沥青再生层所得的弯沉值进行温度修正。目前还没有针对泡沫沥青稳定层的温度修正方法,但其原理应当与沥青稳定料一致。

8.2 再生后的路况调查
万方数据

表 5 试验路段基层表面弯沉测试结果

桩号	测定点数	均值	方差	代表弯沉
		0.01 mm		0.01 mm
+000~+100	17	110.00	27.295	154.90
+310~+390	15	119.71	13.147	141.34
+310~+400	17	130.50	20.324	163.93
+200~+300	16	115.63	26.072	158.51

路面施工后 7 d 对再生路面进行了观测,各再生段未出现任何变形与表面剥落现象,道路通行能力良好。

参考文献:

[1] 德国维特根公司. 维特根冷再生手册[M].
[2] JTJ 059—95,公路路基路面现场测试规程[S].
[3] JTJ 057—94,公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].
[4] K M Muthen. Foamed asphalt mixes — mix design and procedure [S]. Contract report CR — 98/071. South Africa: CSIR Transportek, 1998.
[5] Theriault Y. Some Laboratory and field investigation on combining lime or cement with foamed bitumen [J]. Proceedings, Canadian Technical Asphalt Association, 1998.
[6] 拾方治,赫振华,等. 沥青发泡原理及特性的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2004, 6(2).
[7] 拾方治,孙大权,等. 泡沫沥青混合料物理力学特性的试验研究[J]. 公路, 2004, (5).

投 稿 须 知

《公路》月刊于 1956 年创刊,由中华人民共和国交通部主管,是中国公路行业出版最早的中央级技术类科学技术期刊,是公路运输类核心期刊,是交通部和全国优秀科技期刊。

- 1. 本刊刊登的内容以实用科学、实用技术为主,兼顾理论研究、科学实验与标准规范,还包括方针、政策、管理等内容,对技术水平领先、有创造性、适用推广价值较高的文章优先刊登。
- 2. 投寄本刊的稿件,可以是原稿,也可以是打印稿或 E-mail 文稿(作者必须与原稿核对无误,并签字认可),具体格式请参照本刊近期出版的《公路》杂志。稿件请作、译者自留备份,本刊概不退稿。若文章被采用,本刊即行寄样刊和稿酬,不再另发“用稿通知”。
- 3. 文稿应有“摘要”和“关键词”。“摘要”为全文的浓缩,以提供文章内容梗概为目的,不加评论和补充解释,简明、确切地记述文章重要内容。“关键词”为“摘要”的浓缩,可选 3~8 个。
- 4. 文章中科技术语和名词,请用规定的通用词语。文章内容应符合国家标准和各种行业标准要求,应使用法定计量单位。公式、图表应清晰准确,符合国家标准要求。各级标题应明确、清晰。
- 5. 文章中摘编、引用他人作品,请遵守《著作权法》规定在参考文献中写出。
- 6. 文章著作权,除《著作权法》另有规定外,属于作者。文责自负。署名作者的人数和顺序由作者自定。
- 7. 文章题目、摘要及关键词、作者的姓名和工作单位名称,要求作者翻译成英文。
- 8. 来稿请注明作者的真实姓名、工作单位和详细地址、电话。作者本人的详细信息,包括:学历、简历、身份证号码。请作、译者注意:来稿作者信息不详者,稿件一律不采用。
- 9. 所有来稿文责自负。
- 10. 投稿方式:
您可直接将稿件寄给本刊,地址见本刊“目次”页;
您还可通过 E-mail:paper@chn-highway.com 投稿。通过 E-mail 投稿的作者请注意留下详细联系地址及电话,否则本刊不接受投稿。

《公路》杂志社

Research on Design Method and Engineering Application of Cold In-Place Recycling Mixtures Stabilized with Foamed Bitumen

LI Xiu-jun¹, SHI Fang-zhi², DONG Zhao-Hui³

- (1. Department of Urban Construction and Environment, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
- 2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;
- 3. Shanghai Second Municipal Engineering Co.,Ltd., Shanghai 200235, China)

Abstract: First of all, the old pavement conditions, including the analysis of pavement distress, structural capacity and traffic assessment, are investigated. And then the recycler takes samples in the candidate pavement for cold in-place recycling. The representative samples are assessed and the grading design of the foamed bitumen mixture is determined. The next part of the mix design is to determine the foaming characteristics of bitumen. The standard indirect tensile strength (*ITS*) test will be used to test the compacted and cured foamed bitumen specimens under dry and soaked conditions. And the optimum bitumen content from soaked *ITS* is taken as the design binder content for foamed bitumen mixes. According to the trial pavement construction, the in-place cold recycling constructing technology is introduced and the recycled pavement evaluated as well.

Key words: foamed bitumen; cold in-place recycling; design method; engineering application